

Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XVI (número 3), julio-septiembre 2015: 407-418
ISSN 1405-7743 FI-UNAM
(artículo arbitrado)
doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.001>



Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad

Potential Uses of Bagasse for Ethanol Production Versus Electricity Production

Zumalacárregui-De Cárdenas Lourdes Margarita

*Grupo de Análisis de Procesos
Facultad de Ingeniería Química
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cujae La Habana, Cuba
Correo: lourdes@quimica.cujae.edu.cu*

Pérez-Ones Osney

*Grupo de Análisis de Procesos
Facultad de Ingeniería Química
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cujae, La Habana, Cuba
Correo: osney@quimica.cujae.edu.cu*

Rodríguez-Ramos Pedro Antonio

*Facultad de Ingeniería Mecánica
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cujae, La Habana, Cuba
Correo: parr@economia.cujae.edu.cu*

Zumalacárregui-De Cárdenas Beatriz María

*Grupo de Análisis de Procesos
Facultad de Ingeniería Química
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría
Cujae, La Habana, Cuba
Correo: beatriz@quimica.cujae.edu.cu*

Lombardi Geraldo

*Laboratorio de Termodinámica y Fluidos
Universidade de São Paulo, Brasil
Correo: lombardi@sc.usp.br*

Información del artículo: recibido: marzo de 2014, reevaluado: abril de 2014, aceptado: julio de 2014

Resumen

Se presenta el procedimiento de cálculo aplicado para realizar el balance de energía en la producción de etanol a partir de la hidrólisis del bagazo. Se calcula la pérdida de potencialidades de generación de energía eléctrica que ocasiona utilizar el bagazo para producir etanol en lugar de usarlo para generar electricidad. Con el nivel de eficiencia del proceso de producción de etanol lignocelulósico esta pérdida es de 45-64%. Se analiza la relación que existe entre el volumen de etanol producido y los rendimientos de los ciclos Otto y Rankine mediante los que se utilizarían para producir electricidad a partir de etanol y de bagazo, respectivamente.

Descriptores:

- etanol
- energía
- bagazo
- hidrólisis
- ciclo Otto
- ciclo Rankine

Abstract

The procedure to carry out the energy balance for ethanol production by bagasse's hydrolysis is presented. The loss of potentialities for electric power generation when bagasse is used to produce ethanol instead of electricity directly is calculated. Potential losses are 45-64% according to the efficiency of the lignocellulosic ethanol production. The relationship that exists between the volume of ethanol and the efficiency of Otto and Rankine cycles is analyzed. Those cycles are used to produce electricity from ethanol and bagasse, respectively.

Keywords:

- ethanol
- energy
- bagasse
- hydrolysis
- Otto cycle
- Rankine cycle

Introducción

La crisis del petróleo de los años 70 del siglo XX, comenzó a crear una conciencia mundial acerca de la necesidad de desarrollar fuentes alternativas y renovables de energía (Jolly, 2001). En la actualidad, el incremento del precio del petróleo, ha confirmado esta necesidad. Se vislumbra que en los próximos años el uso del petróleo se vuelva impracticable por su alto precio. También, la utilización de combustibles fósiles, ha provocado un incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (principalmente CO₂), lo que está causando un incremento en la temperatura del planeta, con consecuencias negativas a corto, mediano y largo plazo (Muñoz, 2013; De Souza y Grandis, 2014).

Entre los combustibles provenientes de fuentes renovables se encuentra el etanol, que también es posible obtener a partir de los azúcares hidrolizados de la celulosa contenida en los residuos lignocelulósicos como el bagazo de la caña y otros residuos de la cosecha cañera (Martín, 2002). Existen en la actualidad diferentes procesos con varios grados de avance en la etapa experimental y muchos países interesados en la hidrólisis por vía química o fermentativa del bagazo y la paja de la caña de azúcar, para su fermentación alcohólica, así como la separación de la lignina para su conversión en energía u otros derivados de alto valor agregado.

Por otra parte, en las fábricas de azúcar de caña, el bagazo se ha utilizado como combustible, quemándose en los generadores de vapor, evitando el consumo de petróleo. Con la perspectiva de producir etanol a partir de bagazo (Galbe y Zacchi, 2002), se produce una competencia por este residuo de la producción de azúcar de caña.

Con el desarrollo tecnológico actual alcanzado en la obtención del etanol a partir de materiales lignocelulósicos (Souza y Grandis, 2014) y los niveles de rendimiento que se logran, no es posible todavía utilizar el etanol para generar electricidad en la industria azucare-

ra (Cardona y Sánchez, 2006). Por el momento el bioetanol producido a partir de residuos agroindustriales se ha evaluado como oxigenante en las gasolinas con el fin de obtener un combustible más sustentable (Rodríguez *et al.*, 2003; Dias *et al.*, 2005; Kumar *et al.*, 2010).

Este artículo tiene como objetivo fundamental, recomendar la conveniencia de efectuar un balance energético previo, antes de proceder al hidrolizado de productos con alto contenido de azúcares simples para su conversión en etanol por vía fermentativa. Los resultados permitirán disponer de información para acometer estudios de inversión en plantas industriales, discriminando entre producir etanol por hidrólisis del bagazo o emplear este en la generación eléctrica a partir de su combustión.

Desarrollo

Proceso de obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica

Uno de los principales problemas vinculados con la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica es el pretratamiento e hidrólisis enzimática de la materia prima. El complejo lignocelulósico está compuesto principalmente por una matriz de carbohidratos que contiene celulosa y lignina enlazada por cadenas de hemicelulosas. El pretratamiento, que consiste en las operaciones de recolección, transporte y manipulación, almacenamiento, molienda o astillado y otras, tiene como objetivo desintegrar esta matriz de manera que la celulosa reduzca al máximo su grado de cristalinidad y aumente la celulosa amorfa, que es la más adecuada para el ataque enzimático posterior. Incluye también un tratamiento termoquímico, con el fin de lograr un ablandamiento de la lignina y las hemicelulosas que facilite el ataque posterior de las enzimas.

La mayor parte de la hemicelulosa se hidroliza durante el pretratamiento y la lignina se libera o puede

incluso descomponerse. Uno de los pretratamientos más eficientes es el llamado explosión con vapor, en el que el material lignocelulósico se somete a altas temperaturas (180-240°C) con vapor a presión (0.7-4.9 MPa) durante tiempos cortos (10 minutos). El proceso se detiene por descompresión rápida, lográndose la hidrólisis de más de 80% de las hemicelulosas y algo de celulosa (Abril *et al.*, 2006; Abril y Abril, 2009). Otro de los pretratamientos utilizados es la hidrólisis ácida, tanto con ácido concentrado como diluido. Se reportan estudios para temperaturas entre 188 y 234°C y 7-10 minutos de tiempo de retención (Taherzadeh y Karimi, 2009).

La celulosa liberada se somete a hidrólisis enzimática con celulasas exógenas, lo cual hace que se obtenga una solución de azúcares fermentables que contiene principalmente glucosa, así como pentosas resultantes de la hidrólisis inicial de la hemicelulosa. Estos azúcares se convierten después en etanol mediante microorganismos, generalmente levaduras, que pueden utilizar uno o varios de los azúcares presentes en el material

lignocelulósico pretratado e hidrolizado. En este campo se realizan actualmente investigaciones para obtener microorganismos capaces de producir etanol eficientemente a partir de hexosas y pentosas (Chandel *et al.*, 2011; Huerta *et al.*, 2008).

Por último se realiza la destilación, que en general tiene tres etapas: obtención de etanol crudo (45% vol.), rectificación a 96% vol. y deshidratación a 99.9% vol. En la figura 1 se muestra un diagrama simplificado de las etapas del proceso.

La destilación, tanto para obtener etanol anhidro como hidratado, es una etapa altamente consumidora de energía, donde se le atribuye entre 45 y 50% de todo el calor generado en la combustión. En el proceso de producción de etanol anhidro este consumo depende de la tecnología empleada y varía entre 31 y 64% del valor calórico del etanol anhidro; la energía de combustión del etanol se reporta con un valor de 21.8 a 23.5 GJ/m³ (Kumar *et al.*, 2010). En la tabla 1 se presenta el consumo de energía en MJ/kg de etanol anhidro para cinco

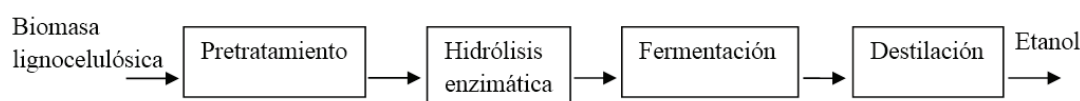


Figura 1. Etapas para la obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica

Tabla 1. Energía consumida en la producción de etanol anhidro

Tecnología	MJ/kg de etanol	Fuente
Destilación azeotrópica con	12.15	Montoya y Quintero, 2005
	15.41	Quintero <i>et al.</i> , 2007
	12.28	Sánchez, 2008
	15.49	Kumar <i>et al.</i> , 2010
	13.59	Montoya y Quintero, 2005
	12.56	Kumar <i>et al.</i> , 2010
	10.87	Montoya y Quintero, 2005
	10.05	Kumar <i>et al.</i> , 2010
Destilación extractiva con	10.69	Quintero <i>et al.</i> , 2007
	10.60	Sánchez, 2008
	18.84	Kumar <i>et al.</i> , 2010
	5.02	Kumar <i>et al.</i> , 2010
	9.27	Montoya y Quintero, 2005
		Kumar <i>et al.</i> , 2010
Tamices moleculares	9.73	Quintero <i>et al.</i> , 2007
	9.65	Sánchez, 2008
Destilación al vacío	15.28	Sánchez, 2008
	11.72	Kumar <i>et al.</i> , 2010
Pervaporación	12.38	Quintero <i>et al.</i> , 2007
	4.61	Kumar <i>et al.</i> , 2010

de las tecnologías de deshidratación más comunes (Montoya y Quintero, 2005; Quintero *et al.*, 2007; Sánchez, 2008; Kumar *et al.*, 2010).

Balance de energía

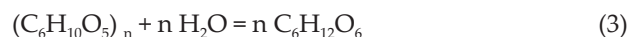
Combustión del etanol producido a partir del bagazo de caña

El bagazo seco contiene aproximadamente 50% de celulosa, 30% de hemicelulosas y 20% de lignina. Cuando se reporta como composición elemental aproximada es posible considerar valores de C: 48.3%; H: 6%; O: 43.3% y cenizas; 2.4% (% en peso) (Mesa y González, 2009). Para un bagazo con un contenido de humedad de 50%, el contenido de celulosa y hemicelulosa por tonelada de bagazo húmedo será

$$0.5 \frac{\text{kg celulosa}}{\text{kg bagazo seco}} * 0.5 \frac{\text{kg bagazo seco}}{\text{kg bagazo húmedo}} = 0.25 \frac{\text{kg celulosa}}{\text{kg bagazo húmedo}} \quad (1)$$

$$0.3 \frac{\text{kg hemicelulosa}}{\text{kg bagazo seco}} * 0.5 \frac{\text{kg bagazo seco}}{\text{kg bagazo húmedo}} = 0.15 \frac{\text{kg hemicelulosa}}{\text{kg bagazo húmedo}} \quad (2)$$

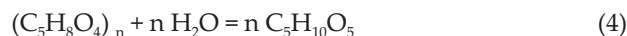
La celulosa puede considerarse formada por unidades de glucosa (7,000 – 15,000 unidades por polímero de celulosa) y su transformación a monómero puede representarse como



De este modo, la máxima cantidad de glucosa a obtener se puede calcular a partir de la relación glucosa/celulosa = 1.111. Según Cardona y Sánchez (2006) la hidrólisis enzimática con celulosas de *Trichoderma reesei* puede considerarse que ocurre con un rendimiento de 80%.

Las hemicelulosas, heteropolímeros de cadenas más cortas (500-3,000 unidades de azúcar), pueden estimarse formadas, en más de 80%, por xilosas (Chandel *et al.*, 2011), de donde se consideró en este trabajo que la xilosa es el único componente presente en las hemicelulosas. A partir de la ecuación estequiométrica, al hidrolizarse se cumplirá que la máxima relación xilano/he-

micelulosa = 1.136. Según Cardona y Sánchez (2006) la hidrólisis ácida (H_2SO_4 0.7% en peso, 190°C, 10 minutos y 1.22 MPa) puede considerarse que ocurre a 75%.



Por consiguiente por tonelada de bagazo húmedo se dispondrá teóricamente de 0.278 kg de glucosa y de 0.170 kg de xilosa que pueden utilizarse para producir etanol por fermentación según



Según la estequiometría, se obtendrán 0.51 kg de etanol por kg de glucosa transformada y 0.51 kg por kg de xilosa transformada de ocurrir la reacción con 100% de conversión. Como la densidad del etanol a 25°C es 0.785 kg/L (Green y Perry, 2008) se obtendrán teóricamente 0.65 L etanol por kg de glucosa o de xilosa transformada. El volumen máximo de etanol (V_{etanol}) a obtener por tonelada de bagazo húmedo, será

$$V_{\text{etanol}} = \frac{0.65 \text{ L etanol}}{\text{kg de glucosa o xilosa}} * \frac{(0.278 \text{ kg glucosa} + 0.17 \text{ kg xilosa}) * 10^3}{T \text{ bagazo húmedo}} = 291 \frac{\text{L etanol}}{T \text{ bagazo húmedo}} \quad (7)$$

Considerando una conversión de 92% para la transformación de glucosa en etanol utilizando *Saccharomyces cerevisiae* y de 85% para la de xilosa en etanol utilizando *Candida shehatae* (Cardona y Sánchez, 2006) se obtendrá un volumen de etanol (V_{etanol}) por tonelada de bagazo húmedo de

$$V_{\text{etanol}} = \frac{0.65 \text{ L etanol}}{\text{kg de glucosa o xilosa}} * \frac{(0.278 \text{ kg glucosa} * 0.80 * 0.90 + 0.17 \text{ kg xilosa} * 0.75 * 0.85)}{T \text{ bagazo húmedo}} = 200 \frac{\text{L etanol}}{T \text{ bagazo húmedo}} \quad (8)$$

Dado que el poder calorífico inferior (PCI) del etanol a 25°C es 26.9 MJ/kg (Green y Perry, 2008) equivalente a 21.1 MJ/L, si se quemara todo el etanol producido se liberarían 4,220 MJ/T de bagazo húmedo.

No obstante, hasta el presente, los resultados de procesos que utilizan ambas fuentes, la celulosa y las hemicelulosas son limitados, por lo que algunos autores consideran solamente la utilización de la celulosa (Seleghim y Polikatskov, 2009). De acuerdo con ello, se obtendría un menor volumen de etanol equivalente a

$$V_{\text{etanol para celulosa}} = \frac{0.65 \text{ L etanol}}{\text{kg de glucosa o xilosa}} \cdot \frac{(0.278 \text{ kg glucosa} \cdot 0.80 \cdot 0.90) \cdot 10^3 \text{ kg}}{\text{T bagazo húmedo}} \cdot \frac{10^3 \text{ kg}}{\text{T}} \quad (9)$$

$$= 130 \frac{\text{L etanol}}{\text{T bagazo húmedo}}$$

Por consiguiente, la energía producida al quemar el etanol obtenido a partir de la celulosa sería 2,743 MJ/T de bagazo húmedo.

La combustión de ese etanol se realizaría según

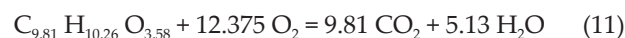


De acuerdo con la reacción representada en la ecuación (10), si se quemara el etanol producido a partir de celulosa y hemicelulosas (200 L/T de bagazo húmedo) se consumirían 0.330 T de O_2/T de bagazo húmedo y se producirían 0.302 T de CO_2/T de bagazo húmedo. Si se trabajara solamente con el etanol obtenido a partir de las celulosa se consumirían 0.210 T de O_2/T de bagazo húmedo y se producirían 0.195 T de CO_2/T de bagazo húmedo.

Combustión de la lignina contenida en el bagazo de caña

La lignina es un material polifenólico, amorfo, con estructura tridimensional, derivado de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropiónicos (cumárico, coniferílico y sinálico). Estas estructuras son muy complejas. Quesada y colaboradores (2011) demostraron que la conversión de la biomasa en atmósfera de aire, como sucede en la combustión, es un proceso mayormente exotérmico, lo que justifica su uso como biocombustible y que todos los fragmentos de biomasa se oxidan a CO_2 y H_2O .

Se ha reportado una composición elemental (% en peso) de la lignina de C: 63.54%; H: 5.54%; O: 30.92% y un PCI de 23.91 MJ/kg de lignina (Berlin *et al.*, 2005). De acuerdo con esta composición y con la masa molar reportada en la literatura para la lignina obtenida en procesos de producción de bioetanol de 185.12 kg/kmol (Nour y Salvadó, 2004) se obtuvo una fórmula molecular para esta de $\text{C}_{9,81} \text{H}_{10,26} \text{O}_{3,58}$. Así la reacción de combustión que ocurriría sería



Conociendo que en el bagazo seco la lignina representa 20% y que el bagazo tiene 50% de humedad

$$0.2 \frac{\text{kg lignina}}{\text{kg bagazo seco}} \cdot 0.5 \frac{\text{kg bagazo seco}}{\text{kg bagazo húmedo}} = 0.10 \frac{\text{kg lignina}}{\text{kg bagazo húmedo}} \quad (12)$$

De aquí que teóricamente se obtendrían 2,391 MJ/T de bagazo húmedo al quemar la lignina contenida en el bagazo.

Por otra parte, de acuerdo con la reacción representada por la ecuación (11), se requerirían 2.14 T de O_2 y se producirían 2.33 T de CO_2 por tonelada de lignina quemada. Como la lignina en el bagazo húmedo representa 10%, se obtendrían 0.233 T de CO_2 por tonelada de bagazo húmedo alimentado al proceso.

Combustión directa del bagazo de caña

Para calcular la energía que libera el bagazo al quemarse se requiere conocer el porcentaje de bagazo seco en la caña de azúcar. Se considera que es de 13-17% (Rodríguez *et al.*, 2010). Dada la composición elemental, es posible obtener una fórmula empírica aproximada de $\text{C}_{4,12} \text{H}_{6,14} \text{O}_{2,77}$. La combustión del bagazo ocurre según



El PCI del bagazo seco es 17,790 kJ/kg_{bagazo} (Zumalacárregui *et al.*, 2008). Conocida la humedad del bagazo es posible calcular el poder calorífico inferior del bagazo húmedo, a partir del contenido de bagazo seco y de la humedad, como

$$\text{PCI}_{\text{bagazo húmedo}} = ((1 - 0.01 \cdot H) \cdot \text{PCI}_{\text{bagazo seco}}) - ((0.01 \cdot H) \cdot L) \quad (14)$$

donde H es la humedad del bagazo en % y L es el calor latente de vaporización H_2O a 25°C en kJ/kg.

Si el calor latente de vaporización del H_2O (25°C) es 2,442.3 kJ/kg de agua (Green y Perry, 2008) y la humedad del bagazo 50%, el PCI del bagazo de 50% de humedad será 7,674 kJ/kg_{bagazo húmedo}. De aquí que por tonelada de bagazo húmedo que se queme se entregará un poder calorífico total (PCT) de 7 674 MJ.

Por otra parte, de acuerdo con la reacción representada en la ecuación (14), se consumen 1,368 T de O_2 /T de bagazo seco y se producen 1,815 T de CO_2 /T de bagazo seco. Como se ha considerado 50% de humedad en el bagazo, las emisiones de CO_2 serían 0.907 T de CO_2 /T bagazo húmedo.

Disminución del poder calorífico total

Cuando el bagazo de caña se desvía de la producción de vapor y electricidad para producir etanol, considerando que se transforman celulosas y xilosas, hay una disminución del poder calorífico total (PCT) equivalente a

Disminución del poder calorífico total (PCT)

$$= \frac{PCT_{\text{bagazo húmedo}} - PCT_{\text{etanol}}}{PCT_{\text{bagazo húmedo}}} * 100 \quad (15)$$

Posibilidades de producción de electricidad a partir lignina

Debido a que con la producción de etanol se deja de producir electricidad comparada con la generada a partir del bagazo directamente, se cuantificó la potencialidad de producir electricidad a partir de la lignina.

Considerando una planta de generación que opere según un ciclo Rankine de un rendimiento eléctrico de la instalación $Rend_{\text{Rankine}} = 35\%$, el trabajo eléctrico (E) producido al utilizar como combustible la lignina puede evaluarse de

$$E_{\text{lignina}} = PCT_{\text{lignina}} * Rend_{\text{Rankine}} / 100 \quad (16)$$

Posibilidad de producción de electricidad a partir de biogás

Como parte del proceso de producción de etanol se generan vinazas, líquido residual procedente de las columnas de destilación, que se pueden utilizar para la producción de biogás en un digestor anaerobio, que

constituye otra fuente de energía. Considerando que se generan 13 m³ de vinazas por m³ de etanol en la etapa de destilación y 7 Nm³ de biogás por m³ de vinazas producto de la degradación anaeróbica de estos efluentes (Zumalacárregui *et al.*, 2008), se obtendrían 91 Nm³ de biogás/m³ etanol o 18.2 Nm³ de biogás por tonelada de bagazo húmedo considerando la conversión de las hemicelulosas o 11.8 Nm³ de biogás por tonelada de bagazo húmedo si solamente se convierten en etanol la celulosa.

La composición aproximada del biogás obtenido con tecnologías convencionales puede tomarse como: 50% CH_4 y 50% CO_2 (% molares). El poder calórico inferior de este biogás es 21.3 MJ/m³ (Rodríguez *et al.*, 2010).

El CH_4 contenido en el biogás se quema de acuerdo con la ecuación (17) que es en esencia la que caracteriza el poder combustible del biogás formado



Discusión y análisis de resultados

Disminución del poder calorífico total

Aplicando la ecuación (15), la disminución de poder calorífico total cuando el bagazo de caña se desvía de la producción de vapor y electricidad para producir etanol, considerando que se transformen celulosas y xilosas y que se generen 4,220 MJ/T de bagazo, es equivalente a 45%.

Si solamente se considerara el etanol producido por las celulosas y por consiguiente el PCT fuera el correspondiente al etanol de celulosa (2,743 MJ/ T de bagazo húmedo), esta disminución sería de 64.3%.

Como se aprecia, desde el punto de vista puramente energético, producir etanol a partir del bagazo de caña conduce a un menor potencial de energía disponible en el sistema para la producción de calor y electricidad.

Posibilidad de producción de electricidad a partir lignina y biogás

Aplicando la ecuación (16) y dado que se producen 2,391 MJ/ T de bagazo húmedo se obtendrían 837 MJ de electricidad por la combustión en un ciclo de Rankine de la lignina obtenida a partir de una tonelada de bagazo húmedo.

De igual forma, para los 18.2 Nm³ de biogás por tonelada de bagazo húmedo considerando la conversión de las hemicelulosas o 11.8 Nm³ de biogás por tonelada de bagazo húmedo si solamente se convierten en etanol la celulosa, con la combustión del biogás producido se

obtendrían 388 MJ/ T de bagazo húmedo a partir del biogás producido por 200 L de etanol o 251 MJ/T de bagazo húmedo a partir del biogás producido por 130 L de etanol.

Al quemar los 18.2 Nm³ de biogás por tonelada de bagazo húmedo de 50% de humedad, se consumirían 9.1 Nm³ de O₂. Las emisiones de CO₂ ascenderían a 18.2 Nm³ de CO₂ por tonelada de bagazo húmedo producto de la cantidad formada en la reacción de combustión del metano (9.1 Nm³ por tonelada de bagazo húmedo) y al CO₂ que ya contenía el biogás. Este resultado corresponde a 0.033 T de CO₂ por tonelada de bagazo húmedo. Cuando se queman 11.8 Nm³ de biogás por tonelada de bagazo húmedo, las emisiones de CO₂ ascenderían a 11.8 Nm³ de CO₂ por tonelada de bagazo húmedo.

Pérdida del potencial energético disponible en forma de trabajo eléctrico

Posibilidad de producción de electricidad a partir del etanol

Si el etanol producido se quemara como combustible en un ciclo Otto de rendimiento eléctrico de la instalación Rend_{Otto} = 35%, el trabajo eléctrico generado sería

$$E_{\text{etanol}} = PCT_{\text{etanol}} * \text{Rend}_{\text{Otto}} / 100 \quad (18)$$

De aquí que se producirían 1,477 MJ de electricidad por la combustión en un ciclo Otto del etanol que se pudiera producir a partir de una tonelada de bagazo húmedo y de 960 MJ de electricidad si solamente se utilizara el etanol obtenido de la transformación de la celulosa.

Posibilidad de producción de electricidad directamente a partir del bagazo húmedo

Considerando una planta de generación que opere según un ciclo Rankine de un rendimiento eléctrico de la instalación Rend_{Rankine} = 35%, el trabajo eléctrico (E) producido será

$$E_{\text{bagazo húmedo}} = PCT_{\text{bagazo húmedo}} * \text{Rend}_{\text{Rankine}} / 100 \quad (19)$$

De aquí que se producirían 2,686 MJ de electricidad por tonelada de bagazo húmedo quemado en un ciclo de Rankine.

Electricidad que se deja de producir cuando se obtiene etanol a partir del bagazo

Si se toma como base el trabajo eléctrico que se produce cuando se quema el bagazo directamente, el porcentaje que representa la diferencia entre este y el trabajo eléctrico producido a partir del etanol se calcula como

% de trabajo eléctrico dejado de producir

$$= \frac{E_{\text{bagazo húmedo}} - E_{\text{etanol}}}{E_{\text{bagazo húmedo}}} * 100 \quad (20)$$

Sustituyendo las ecuaciones 13 y 14 en 15 se arriba a

Fracción de trabajo eléctrico dejado de producir

$$= 1 - \frac{V_{\text{etanol}} \text{PCI}_{\text{etanol}} \text{Rend}_{\text{Otto}}}{\text{PCI}_{\text{bagazo húmedo}} \text{Rend}_{\text{Rankine}}} \quad (21)$$

Dado que PCI_{etanol} / PCI_{bagazo húmedo} = 0.00275 T de bagazo húmedo/L de etanol.

Fracción de trabajo eléctrico dejado de producir

$$= 1 - 0.00275 * \frac{\text{Rend}_{\text{Otto}}}{\text{Rend}_{\text{Rankine}}} V_{\text{etanol}} \quad (22)$$

Para la condición planteada, en que ambos rendimientos son iguales y para el volumen de etanol potencialmente producible a partir de celulosas y hemicelulosas de 200 L por tonelada de bagazo húmedo, el trabajo eléctrico dejado de generar será 1,209 MJ por tonelada de bagazo húmedo, que corresponde a 45% de la electricidad que se obtendría quemando directamente el bagazo. La situación se agrava si se considera solamente el bagazo obtenible de la celulosa, dejándose de producir 1,726 MJ de trabajo eléctrico por tonelada de bagazo húmedo.

Por lo anterior, la decisión de quemar bagazo o producir etanol a partir del bagazo estará sujeta al análisis técnico económico considerando la posibilidad de venta estable de energía eléctrica a un precio de 0.2283 \$/kW.h y del precio de 0.452 \$/L para la venta del etanol producido. Estos precios corresponden a los utilizados en Cuba. En la tabla 2 se presenta una comparación sobre la base de 1 tonelada de bagazo húmedo que permite concluir que:

- La producción de etanol celulósico a partir de bagazo de caña para su venta como combustible, no es económicamente atractiva, aun cuando se considera

Tabla 2. Ingresos obtenidos por venta de electricidad y etanol

Alternativa de combustión de	Electricidad producida		Etanol obtenido	Ingresos por venta de electricidad \$	Ingresos por venta de etanol \$
	MJ	kW.h			
Bagazo húmedo	2 686	746.11	0	170.34	0
Lignina	837	232.5	0	53.08	0
Biogás (a partir de A)	136	37.78	0	8.62	0
Biogás (a partir de B)	88	24.44	0	5.58	0
Etanol obtenido a partir de					
Considerar la transformación de glucosa + celulosa + hemicelulosas (A)	1 477	410.28	200	93.67	90.40
No considerar la transformación de las hemicelulosas (B)	960	266.67	130	60.88	58.76
Combinaciones de					
Etanol (a partir de A) + Lignina + Biogás (a partir de A)	2 450	680.56	200	155.37	90.40
Etanol (a partir de A) + Lignina	2 314	642.78	200	146.75	90.40
Etanol (a partir de A) + Biogás (a partir de A)	1 613	448.06	200	102.29	90.40
Etanol (a partir de B) + Lignina + Biogás (a partir de B)	1 885	523.61	130	119.54	58.76
Etanol (a partir de B) + Lignina	1 797	499.17	130	113.96	58.76
Etanol (a partir de B) + Biogás (a partir de B)	1 048	291.11	130	66.46	58.76

la transformación de las hemicelulosas y las celulosas simultáneamente, al comparar con los ingresos que se obtienen por la electricidad vendida a partir de la combustión directa del bagazo de caña (\$90.40 vs \$170.34).

- Aun considerando la combustión de la lignina y la obtención de biogás a partir de las vinazas generadas y su combustión para la producción de electricidad, con la alternativa de quemar el bagazo de caña se obtienen mayores ingresos por la venta de la electricidad. Se puede observar que la venta de la electricidad producida al quemar el etanol, la lignina y el biogás es \$155.37.

Sin embargo, si se consideran los precios utilizados en Estados Unidos para la venta de energía eléctrica al sector industrial de 0.0675 USD/kW.h según la EIA (U.S Energy Information Administration, abril 2014) y para la venta del etanol producido a 0.6016 USD/L (julio 2014) los resultados serían:

- La producción de etanol celulósico a partir de bagazo de caña para su venta como combustible es económicamente atractiva, si el etanol se produce a partir de la conversión de la celulosa y las hemicelulosas (120.32 vs 50.36 USD) o sin considerar la transformación de las hemicelulosas (78.21 vs 50.36 USD).
- Con la quema del bagazo de caña para la producción y venta de la electricidad se obtienen mayores ingresos que con la venta de la electricidad producida al

quemar el etanol, la lignina y el biogás (50.36 vs 45.94 USD).

De modo general, en la ecuación (22) se observa que la fracción de trabajo eléctrico que se deja de producir dependerá del volumen de etanol y de la relación entre los rendimientos de los ciclos Otto y Rankine. En la figura 2 se presenta la dependencia de la fracción de trabajo eléctrico no producido con el volumen de etanol producido en el proceso para diversas relaciones $\text{Rend}_{\text{Otto}}/\text{Rend}_{\text{Rankine}}$.

De la figura 2 se aprecia que:

- A medida que el rendimiento del proceso de producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos es más eficiente, produciéndose más etanol por tonelada de bagazo húmedo, el trabajo eléctrico que no se produce por la utilización del bagazo para obtener etanol se reduce.
- A medida que el ciclo Otto es más eficiente, el trabajo eléctrico deja de producir por la utilización del bagazo para la obtención de etanol, se reduce.
- Para el nivel de eficiencia actual en la producción de etanol lignocelulósico, se requerirían valores de $\text{Rend}_{\text{Otto}}/\text{Rend}_{\text{Rankine}}$ superiores a 1.82 para que el trabajo eléctrico producido a partir de etanol fuera comparable al producido a partir del bagazo.

Por consiguiente, la decisión de proceder a producir etanol o electricidad a partir del bagazo de caña depen-

derá de las cantidades a obtener y de los precios de venta de estos dos productos, así como del tiempo de trabajo anual de la destilería. Este último aspecto influiría en la viabilidad de la venta estable de electricidad al sistema electro-energético del país, situación de las destilerías tradicionales que operan 8-10 meses por año, para las que la producción de electricidad deja de ser una prioridad.

Sin embargo, para una destilería integrada a la producción de alimentos (GERIPA) (Rodríguez *et al.*, 2010), que funcione todo el año por el uso de caña de azúcar o sorgo dulce como fuentes primarias de azúcares, la venta estable de electricidad no resulta un problema, con lo que la reducción de la potencialidad de generación tiene un mayor peso en el análisis.

Comparación considerando las diferentes fuentes de energía

A partir de una tonelada de bagazo húmedo es posible obtener teóricamente 200 L de etanol, 100 kg de lignina y 18.2 m³ de biogás. Si se considera solamente el etanol a partir de celulosa se obtendrían: 130 L de etanol, 100 kg de lignina y 11.8 m³ de biogás. En los epígrafes anteriores se ha calculado que en términos energéticos se obtendrían: 1,477 MJ de electricidad a partir del etanol producido por celulosas y hemicelulosas o 960 MJ de electricidad a partir del etanol producido considerando solamente la celulosa, 837 MJ de electricidad a partir de la lignina y 136 MJ del biogás a partir del etanol producido por celulosas y hemicelulosas o 88 MJ del biogás a partir del etanol producido considerando solamente la celulosa. Por consiguiente se producirían 1,885 MJ por tonelada de bagazo húmedo transformado en el proceso de obtención de etanol lignocelulósico sin transformar las

hemicelulosas que representaría el poder calorífico global del proceso, que puede utilizarse en la producción de electricidad y como vapor de proceso, por ejemplo, para satisfacer los consumos energéticos en la destilación.

Si se compara este resultado con la energía obtenida de 2,686 MJ de electricidad por tonelada de bagazo húmedo quemado directamente en un ciclo de Rankine, puede apreciarse cómo la pérdida de potencialidad energética calculada en el epígrafe 3.1 se reduce.

Disminución del poder calorífico global (PCG)

$$= \frac{PCT_{\text{bagazo húmedo}} - PCG}{PCT_{\text{bagazo húmedo}}} * 100 = 29.8\% \quad (23)$$

Emisiones de gases generadas por la producción de electricidad

Otro aspecto que debe estudiarse al comparar las alternativas de quemar el bagazo de caña directamente o quemar el etanol y subproductos producidos a partir del bagazo de caña, es la cuantificación de las emisiones de gases efecto invernadero que se producirían por ambas vías. Para ello se calculó la máxima cantidad de CO₂ que se forma a partir de todas las reacciones de combustión asociadas a los procesos. En la tabla 3 se presenta el resultado de estas emisiones al medio.

Como se aprecia en la tabla 3 el uso del bagazo para producir el etanol anhidro reduce las emisiones de CO₂ a la atmósfera en comparación con las que se incorporarían de quemar directamente el bagazo en los generadores de vapor. Esta disminución es de 37.5% si se quema el etanol obtenido a partir de celulosa y hemicelulosas y de 49.5% si solamente se produce etanol de la celulosa.

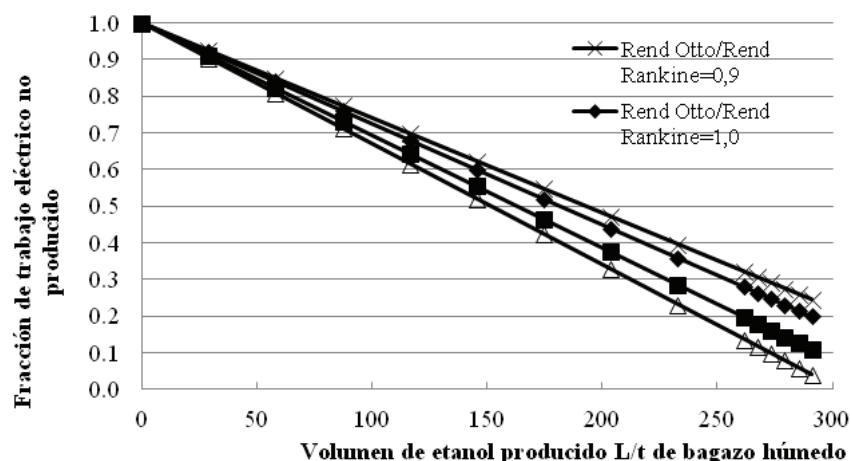


Figura 2. Relación entre la fracción de trabajo eléctrico no producido y el volumen de etanol para diversas relaciones entre los rendimientos Otto y Rankine

Tabla 3. Máximas emisiones de CO₂ que se obtendrían por la combustión de los combustibles

Combustible	Relación másica CO ₂ /combustible	T CO ₂ / T bagazo húmedo
Bagazo de caña 50% humedad	1.813	0,907
Emisiones asociadas a la producción de etanol lignocelulósico		
Etanol a partir de celulosa y hemicelulosa	1.91	0.302
Etanol a partir de celulosa	1.91	0.195
Lignina	2.33	0.233
Biogás (del etanol a partir de celulosa y hemicelulosa)	2.75 (vs metano)	0.032
Biogás (del etanol a partir de celulosa)	2.75 (vs metano)	0.021
Total considerando celulosa y hemicelulosa	-	0.567
Total considerando celulosa	-	0.449

Por consiguiente, si bien la quema del bagazo para producir electricidad resulta ventajosa desde el punto de vista energético, desde el punto de vista ambiental utilizar el bagazo para la producción de etanol reduce las emisiones de gases contaminantes. Para ver un análisis integral se deben considerar los efectos negativos que producen otros residuales generados en el proceso de producción de etanol, por ejemplo: las vinazas en la etapa de destilación.

Conclusiones

Energéticamente, producir etanol por hidrólisis del bagazo ocasiona una pérdida de las potencialidades de producción de electricidad entre 45% y 64% (en dependencia de si se considera el etanol producido a partir de celulosas y hemicelulosas o solamente de celulosas) cuando se compara con la electricidad producida quemando el bagazo húmedo (50%). Si se utiliza la lignina contenida en el bagazo y se produce biogás a partir de las vinazas de destilería esta pérdida de potencialidades energéticas se reduce 35%. Por otra parte, las emisiones de CO₂ disminuyen si se produce etanol a partir del bagazo, aun cuando se queme la lignina y el biogás para producir mayor cantidad de energía, de donde la alternativa de producción de etanol a partir del bagazo es beneficiosa desde el punto de vista ambiental.

Por consiguiente, la decisión de proceder a producir etanol o electricidad a partir de bagazo dependerá de la eficiencia en la transformación de las celulosas y hemicelulosas contenidas en el bagazo que hasta hoy son bajas lo que no hace competitiva la producción de bioetanol a partir de materiales lignocelulósicos en comparación con la producción de electricidad en algunos países. Es por ello que cada país debe trazar su estrategia de qué es lo más conveniente en función de las tecnologías empleadas, cantidades a producir y precios de venta.

Referencias

- Abril A.J., Aroca G., Sabatier J.D. Etanol a partir de biomasa lignocelulósica, Monografía, Cuba, CYTED, 2006, 74 p.
- Abril D., Abril A.J. Ethanol from lignocellulosic biomass. *Cien. Inv. Agr.*, volumen 36 (número 2), mayo-agosto 2009: 177-190.
- Berlin A.A., Novakov I.A., Khalturinskiy N.A., Zaikor G.E. *Chemical physics pyrolysis, combustion and oxidation*, 1st edition, Nueva York, Nova Science Publishers Inc., 2005, pp. 55-80.
- Cardona C.A., Sánchez O.J. Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass. *Energy*, volumen 31 (número 13), octubre 2006: 2447-2459.
- Chandel A.K., Chandrasekhar G., Radhika K., Ravinder R., Ravindra P. Bioconversion of pentose sugars into ethanol: A review and future directions. *Biotechnology and Molecular Biology Review*, volumen 6 (número 1), enero 2011: 8-20.
- De Souza A.P., Grandis A. Sugarcane as bioenergy source: History, performance, and perspectives for second-generation bioethanol. *Bioenerg. Res.*, volumen 7, 2014: 24-35.
- Dias M.E., Vaughan B.E., Rykiel Jr. E.J. Ethanol as fuel: Energy, carbon dioxides balances and ecological footprint. *BioScience*, volumen 55 (número 7), julio 2005: 593-602.
- Galbe M., Zacchi G. A review of the production of ethanol from softwood. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, volumen 59, Julio 2002: 618-628.
- Green D. y Perry R.H. *Perry's Chemical engineering handbook*, 8th edition, USA, McGraw-Hill, 2008, Section 2, pp. 96-517.
- Huerta-Beristain G., Utrilla J., Hernández-Chávez G., Bolívar F., Gosset G. Martínez J. Specific ethanol production rate in ethanologenic *Escherichia coli* strain KO11 is limited by pyruvate decarboxylase. *J. Mol. Microbiol. Biotechnol.*, volumen 15 (número 1), marzo 2008: 55-64.
- Jolly L. The commercial viability of fuel ethanol from sugarcane. *International Sugar Journal*, volumen 103 (número 1227), 2001: 117-125.

- Kumar S., Singh N., Prasad R. Anhydrous ethanol: A renewable source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volumen 14, 2010: 1830-1844.
- Martín C. *Estudio de la inhibición de la fermentación de hidrolizados de bagazo de caña de azúcar para la producción de etanol*, (tesis de doctorado en ciencias técnicas), Cuba, Universidad de Matanzas, Facultad de Mecánica y Química, 2002, 100 pp.
- Mesa J., González L. Balance de CO₂ en la obtención de energía renovable a partir de caña de azúcar, El Cid Editor, Santa Fe, Argentina, 2009 [en línea]. Disponible en: base de datos electrónica E-libro.
- Montoya M.I., Quintero J.A. *Esquema tecnológico integral de la producción de bioetanol carburante*, (tesis trabajo de grado), Colombia, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2005, 144 pp.
- Muñoz N.P. La estrategia nacional de cambio climático, Tercer Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático, 14 al 18 de octubre 2013, Instituto Politécnico Nacional (IPN), México, 2013.
- Nour-Eddine E.M., Salvadó J. Técnicas de caracterización de lignina. Aplicación a ligninas técnicas de 5 orígenes distintos, en Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel (III, 2004, Córdoba, España). CIADICYP, Córdoba, España, RIADICYP, 2004, p. 1-8.
- Quesada O., Torres D., Alfonso F. Estudio de la degradación térmica del residuo de la naranja. *Revista Cubana de Química*, volumen 23 (número 1), enero-abril, 2011: 25-33.
- Quintero J.A., Montoya, M.I., Sánchez O.J., Cardona C.A. Evaluación de la deshidratación de alcohol carburante mediante simulación de procesos. *Revista Facultad de Ciencia Agropecuarias*, volumen 5 (número 2), enero-junio, 2007: 73-83.
- Rodríguez P.A., Lombardi G., Corsini R., Pérez O. Destilería diversificada de alcohol. *Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, volumen 28, abril 2003: 37-49.
- Rodríguez P.A., Lombardi G., Ometto A., Zumalacárregui L., Pérez O. Potencialidades de la generación de electricidad a partir de biomasa. *Scientia et Technica*, volumen 2 (número 45), enero-abril, 2010: 267-277.
- Sánchez O.J. *Síntesis de esquemas tecnológicos integrados para la producción biotecnológica de alcohol carburante a partir de tres materias primas colombianas*, (tesis de doctorado en ingeniería), Colombia, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2008, 150 pp.
- Seleglim P., Polikatpov, I. Desafíos para transformar conceptos en realidad. *Scientific American Brasil*, (número 87), agosto 2009: 32-37.
- Taherzadeh M., Karimi K. Acid-based hydrolysis process for ethanol from lignocellulosic materials: a review. *Bioresources*, volumen 2 (número 3), agosto 2007: 472-499.
- Zumalacárregui L., Pérez O., Rodríguez P.A., Lombardi G. y Zumalacárregui B. Cálculo del beneficio ambiental de la caña de azúcar para la producción de etanol combustible. *Ingeniería y Competitividad*, volumen 10 (número 1), enero-junio 2008: 65-71.

Este artículo se cita:

Citación estilo Chicago

Zumalacárregui-De Cárdenas, Lourdes Margarita, Osney Pérez-Ones, Pedro Antonio Rodríguez-Ramos, Beatriz María Zumalacárregui-De Cárdenas, Geraldo Lombardi. Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVI, 03 (2015): 407-418.

Citación estilo ISO 690

Zumalacárregui-De Cárdenas L.M., Pérez-Ones O., Rodríguez-Ramos P.A., Zumalacárregui-De Cárdenas B.M., Lombardi-G. Potencialidades del bagazo para la obtención de etanol frente a la generación de electricidad. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVI (número 3), julio-septiembre 2015: 407-418.

Semblanzas de los autores

Lourdes Margarita Zumalacárregui-De Cárdenas. Doctora en ciencias técnicas (1997), máster en análisis de procesos (1979), Ingeniera química (1972), profesora titular (2002), profesora consultante (2006), profesora de mérito (2014), vicedecana de la Facultad Ingeniería Química Cujae (1986-1992), decana en la Facultad Ingeniería Química Cujae (1992-2002), vicerrectora Cujae (2002-2005) y desde 2007 es jefe del grupo de investigaciones análisis de procesos. Obtuvo el Premio Nacional de Ingeniería Química de la Sociedad Cubana de Química en 2011 y el Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba en 2012. Es miembro del Comité Técnico Evaluador de la Junta de Acreditación Nacional y del Consejo Técnico Asesor del Ministerio de Educación Superior y vicepresidente del Tribunal Nacional de Grados Científicos en Ingeniería Química.

Osney Pérez-Ones. Doctor en ciencias técnicas (2011), máster en tecnología de la industria azucarera (2003), ingeniero químico (1998), profesor auxiliar (2012), es vicedecano desde 2011 en la Facultad Ingeniería Química Cujae. Obtuvo el Premio Nacional de la Academia de Ciencias de Cuba en 2012. Es miembro de la Bolsa de Expertos para la Acreditación de Maestrías de la Junta de Acreditación Nacional del Ministerio de Educación Superior y de la Sección de Ciencias Técnicas de la Comisión Nacional de Grados Científicos.

Pedro Antonio Rodríguez-Ramos. Doctor en ciencias técnicas (1986), máster en transporte marítimo (1977), ingeniero naval (1977), profesor titular (1998) y vicerrector Cujae de 2008 a 2013.

Beatriz María Zumalacárregui-De Cárdenas. Doctora en ciencias químicas (1991), licenciada química (1975), profesora titular (2007), profesora consultante (2008), jefe del Departamento de Fundamentos Químicos y Biológicos de la Facultad Ingeniería Química Cujae (1997-2002). Fue vicedecana en la Facultad Ingeniería Química Cujae (2002-2009). Es decana de la Facultad Ingeniería Química Cujae desde 2009 y miembro del Comité Técnico Evaluador de la Junta de Acreditación Nacional y de la Junta Directiva de la Sociedad Cubana de Química.

Geraldo Lombardi. Es doctor en ciencias técnicas (1971), ingeniero aeronáutico (1957) y profesor titular desde 1995.